

Rancang Bangun Inertial Measurement Unit Sebagai Sistem Monitoring Kendaraan Bergerak Berbasis Sensor Accelerometer dan Gyroscope

Achmad Hidayatno dan Wahyudi

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Jln. Prof. Sudarto, SH Tembalang Semarang 50275

email: achmad@undip.ac.id, wahyuditinom@yahoo.com

Abstrak— IMU (*Inertial Measurement Unit*) sangat berguna pada sistem navigasi dan kendali. IMU yang terdiri dari enam derajat kebebasan tersusun dari tiga sensor accelerometer dan tiga sensor gyroscope yang masing-masing ditempatkan pada tiga sumbu (x, y, dan z) dan saling tegak lurus. Sistem monitoring kendaraan yang ada pada saat ini hanya memberikan informasi keadaan kendaraan pada dua derajat kebebasan (X dan Y), sehingga tidak diketahui rotasi kendaraan tersebut. Untuk dapat mengetahui kendaraan secara keseluruhan, yaitu pada enam derajat kebebasan yang terdiri dari tiga data posisi dan tiga data rotasi, maka diperlukan suatu IMU dengan enam derajat kebebasan, yaitu dengan menggunakan sensor accelerometer dan gyroscope yang dipasang pada ketiga sumbu. Pada penelitian telah dilakukan perancangan sensor IMU sebagai sistem monitoring kendaraan bergerak dengan enam derajat kebebasan, sehingga dapat diketahui kondisi kendaraan pada enam derajat kebebasan, yaitu posisi x, y, dan z serta rotasi pada ketiga sumbu (*roll*, *pitch*, dan *yaw*). Sistem IMU ini menggunakan antenna transceiver sebagai media transmisi data. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan pengukuran terhadap sudut attitude 90° dengan sumbu putar sumbu x, sumbu y, sumbu z dengan 7 variasi pengujian menghasilkan MSE rata-rata sumbu x sebesar 2,277°, sumbu y sebesar 2,519°, sumbu z sebesar 3,334° dan pengukuran terhadap jarak 30 cm untuk sumbu x, sumbu y, dan sumbu z dengan 7 variasi pengujian menghasilkan adanya MSE rata-rata sebesar 2,659 cm untuk sumbu x, 3,995 cm untuk sumbu y, dan 2,142 cm untuk sumbu z.

Abstract—IMU (*Inertial Measurement Unit*) is very important in navigation and control systems. The IMU that has six degrees of freedom consists of three accelerometer sensors and three gyroscope sensors, each placed on three axes (x, y, and z) and orthogonal to each other. Vehicle monitoring systems that exist at present only provide information on the vehicle at two degrees of freedom (X and Y), so that the rotation of the vehicle is unknown. To be able to find the vehicle as a whole, namely the six degrees of freedom consisting of three position data and three rotation data, it would require an IMU with six degrees of freedom, namely by using the accelerometer and gyroscope sensor mounted on all three axes. In the research has been conducted design IMU sensors as the vehicle monitoring system with six degrees of freedom, so that can know the condition of the vehicle in six degrees of freedom, namely the position x, y, and z and rotation in three axes (*roll*, *pitch*, and *yaw*). IMU system uses an antenna transceiver for data

transmission medium. We did the tests of IMU sensors in the initial output, motion response, and testing of navigation. Tests performed on laboratory scale to perform the calibration of the IMU sensor and then performed field tests using a motor vehicle. In laboratory-scale testing is not required transmitter and receiver antennas. Based on the results of the research shown the measurements of the attitude angle 90° with the axis of the rotary axis x, axis y, z axis with 7 variations of the test result in an average MSE of 2.277° x-axis, y axis of 2.519°, z-axis of 3.334° respectively and the measurement to the distance of 30 cm for 7 variations of testing resulted in an average MSE of 2.659 cm for the x-axis, 3.995 cm for the y-axis, and 2.142 cm for the z axis.

Keywords: *IMU, accelerometer, gyroscope, navigasi*

I. PENDAHULUAN

Penelitian tentang IMU sebagai sensor dinamik kendaraan (vehicle) telah banyak dilakukan atau dipublikasikan oleh para peneliti, diantaranya untuk mengklasifikasi jenis jalan yang dilalui kendaraan yaitu jalan datar, jalan kasar, jalan berumput, dan jalan mendaki dengan tingkat akurasi berkisar antara 80 % sampai 100 % [3]. Penelitian IMU yang digunakan untuk mengetahui posisi kendaraan juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya sebagai sistem navigasi pesawat terbang [1], sistem navigasi helikopter [10], kendaraan di dalam air [5], menentukan posisi robot [11], dan untuk peluncuran roket altiteri tentara Amerika Serikat [2]. Ada beberapa buku teks dan penelitian dasar yang menjelaskan bagaimana suatu IMU dibuat, diantaranya adalah perancangan sistem akuisisi data dan sistem pemrosesan pada IMU [4], kalibrasi IMU [7], perancangan filter pada sensor accelerometer dan sensor gyroscope [8,9] dan buku teks tentang roket kendali dan sistem kontrol [6]. Penelitian tentang IMU sangat berguna untuk pengendalian sistem navigasi, sehingga penelitian tentang IMU masih perlu untuk dikembangkan lebih lanjut.

Pada penelitian ini, perancangan sensor IMU sebagai sistem monitoring kendaraan bergerak dengan enam derajat kebebasan, sehingga dapat diketahui kondisi kendaraan pada enam derajat kebebasan, yaitu posisi x, y, dan z serta rotasi pada ketiga sumbu (*roll*, *pitch*, dan *yaw*). Sistem IMU ini menggunakan antenna *transceiver* sebagai media transmisi data.

II. SISTEM NAVIGASI

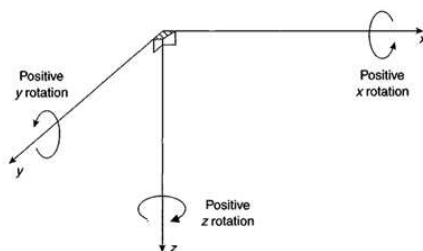
Sistem *inertial navigation* berdasar pada hukum mekanik, yaitu hukum Newton yang menyatakan bahwa gerak pada benda akan terus bergerak seragam sampai ada gangguan gaya dari luar yang mempengaruhi benda dan bahwa gaya akan menghasilkan percepatan proporsional pada masa benda. Percepatan dapat diukur menggunakan sensor *accelerometer*, sehingga untuk system tiga dimensi diperlukan tiga *accelerometer* yang dipasang tegak lurus. Gerak rotasi suatu benda dengan referensi kerangka *inertial* dapat dideteksi menggunakan sensor *gyroscope* yang dapat digunakan untuk mengukur orientasi dari *accelerometer* pada suatu waktu.

Sebagian sistem modern telah mengurangi *platform* sistem mekanik yang kompleks dengan menggunakan sistem sensor tertanam, yang langsung bisa dipasang stabil pada *body*, atau bisa disebut “*strapped down*”. Manfaat yang diperoleh dari penerapan sistem tersebut yaitu harga yang lebih murah, ukuran yang lebih kecil, dan mempunyai tingkat keandalan yang lebih daripada *platform* yang setara. Kelemahan utama yang terjadi adalah peningkatan substansial dengan semakin kompleksnya proses komputasi dan membutuhkan sensor yang dapat membaca dengan lebih cepat. Dengan seiring perkembangan zaman, di mana tingkat pertumbuhan sistem komputasi yang semakin tinggi dan penelitian serta pengembangan alat pengukuran yang semakin maju, kelemahan tersebut dapat tertutup sedikit demi sedikit dan sistem navigasi *inertial* yang ideal semakin mendekati kenyataan.

A. Sistem Koordinat

Koordinat *body* merupakan sistem koordinat yang bereferensi pada objek benda pejal yang bergerak (*rigid body*). Koordinat *body* mendefinisikan arah x positif sebagai arah maju (depan) dari benda pejal, arah y positif adalah arah kanan dari benda pejal dan arah z adalah arah bawah dari benda pejal. Sumbu koordinat *body* mengikuti *body* ketika terjadi perubahan posisi dan perubahan *attitude*. Sistem koordinat *body* ditunjukkan pada Gambar 1. Arah x positif *body* ditunjukkan dengan x, arah y positif *body* ditunjukkan dengan y, dan arah z positif ditunjukkan dengan z.

Koordinat tetap dalam sistem INS adalah sistem koordinat yang bereferensi pada *body* yang bergerak tetapi tidak ikut berotasi. Pendefinisian arah z adalah ke bawah / menuju pusat gravitasi bumi, untuk arah x dan y mengikuti aturan tangan kanan. Untuk mengubah dari sistem koordinat *body* ke sistem koordinat tetap digunakan matriks rotasi.



Gambar 1. Sistem koordinat *body*

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{fixed} = C_{nb} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{body} \quad (1)$$

Koordinat navigasi merupakan suatu pemetaan yang digambarkan seperti koordinat kartesian. Aturan penggambarannya juga sama dengan sistem koordinat kartesian. Koordinat navigasi bisa didapat dari konversi koordinat tetap dengan mengalikan posisi koordinat inersia / tetap dengan matriks konversi (M).

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{navigasi} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{fixed} \quad (3)$$

Posisi benda dalam koordinat navigasi didapatkan dari koordinat *body* dan unsur rotasinya. Pada Gambar 2 ditunjukkan bentuk sistem koordinat navigasi atau bisa disebut juga *reference frame*. Posisi P adalah perpotongan garis titik masing-masing sumbu koordinat navigasi.

B. Strapdown Attitude Representation

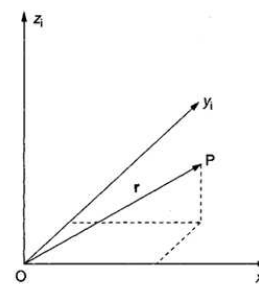
Strapdown Attitude merepresentasikan arah *attitude* atau sikap dari *body*. Ada tiga metode yang digunakan dalam penentuan *attitude*, yaitu direction cosine matrix, euler dan quaternion.

Direction cosine matrix dinotasikan sebagai C_b^n . *Direction cosine matrix* merupakan suatu bentuk matriks rotasi dengan dimensi 3 x 3, dengan kolom-kolomnya merepresentasikan unit vektor pada koordinat *body* yang diproyeksikan sepanjang koordinat referensi atau koordinat navigasi. Matriks C_b^n dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Elemen pada baris ke-i dan kolom ke-j merepresentasikan *cosine* dari sudut antara i-aksis pada koordinat navigasi dan j-aksis pada koordinat *body*. Hubungan antara vektor pada koordinat *body*, *direct cosine matrix*, dan dan vektor pada navigasi dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$V_n = C_b^n V_b \quad (5)$$



Gambar 2. Koordinat navigasi.

Di mana C_n^b adalah matriks rotasi (*direction cosine matrix*), V_n adalah vektor pada koordinat navigasi, dan V_b adalah vektor dari koordinat *body*.

Pada metode *euler* transformasi dari satu bentuk koordinat ke dalam bentuk koordinat yang lain dapat dibangun dengan tiga rotasi berurutan dengan sumbu yang berbeda. Transformasi dari satu koordinat ke dalam koordinat yang baru dapat diekspresikan sebagai berikut:

- Rotasi melalui sumbu z *body* dengan sudut sebesar Ψ .
- Rotasi melalui sumbu y *body* dengan sudut sebesar Θ .
- Rotasi melalui sumbu x *body* dengan sudut sebesar Φ .

Sudut Φ , Θ , Ψ merupakan sudut yang bereferensi pada aturan *euler*. Tipe representasi ini menjadi populer karena telah dibuktikan dengan menggunakan perumpamaan tiga buah gimbal pada *stable platform* oleh Euler.

1. Rotasi sebesar Ψ pada sumbu z menggunakan matriks C_1 pada persamaan 2.15.

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2. Rotasi sebesar Θ pada sumbu y menggunakan matriks C_2 pada persamaan 2.16

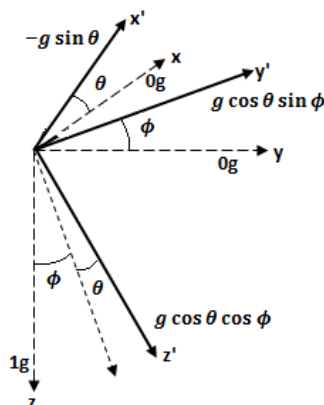
$$C_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. Rotasi sebesar Φ pada sumbu x menggunakan matriks C_3 pada persamaan 2.17

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Transformasi dari koordinat referensi ke koordinat *body* dapat diekspresikan sebagai *product* dari tiga transformasi yang terpisah.

$$C_n^b = C_3 C_2 C_1 \quad (9)$$



Gambar 3. Pengaruh gravitasi pada *body*.

Dalam matematika, *quaternion* merupakan ekstensi dari bilangan-bilangan kompleks yang tidak komutatif, dan diterapkan dalam mekanika tiga dimensi. Setiap *quaternion* adalah kombinasi linier dari basis *quaternion* 1, i , j , dan k , yaitu setiap *quaternion* disajikan secara tunggal dengan bentuk $a+bi+cj+dk$ di mana a , b , c , dan d adalah bilangan-bilangan real. Dengan kata lain, sebagai ruang vektor lewat bilangan-bilangan *real*. Himpunan H dari *quaternion* mempunyai dimensi 4 di mana bidang dari bilangan-bilangan kompleks mempunyai dimensi dua.

Quaternion terdiri dari bagian skalar dengan bilangan $s \in \mathbb{R}$ dan vektor di mana bilangan $v=(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$. *Quaternion* menggunakan aturan sebagai berikut:

$q \in H$ dapat dituliskan :

$$q = [s, v] \quad , s \in \mathbb{R}, v \in \mathbb{R}^3$$

$$q = [s, (x, y, z)] \quad , s, x, y, z \in \mathbb{R}$$

$$q = s + ix + jy + kz \quad , s, x, y, z \in \mathbb{R}$$

Quaternion mempunyai nilai konjugasi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} q^* &= [s, v]^* \\ &= [s, -v] \\ &= s - ix - jy - kz \end{aligned}$$

Norm dari *quaternion* diperlihatkan pada persamaan

$$\|q\| = \sqrt{qq^*} = \sqrt{q^*q} = \sqrt{s^2 + v \cdot v} = \sqrt{s^2 + x^2 + y^2 + z^2}$$

Nilai *inverse* dari *quaternion* diperlihatkan pada persamaan

$$q^{-1} = \frac{q^*}{\|q\|^2} = \frac{s - xi - yj - zk}{|q|^2}$$

Representasi *quaternion* dalam sudut *euler* diperlihatkan persamaan

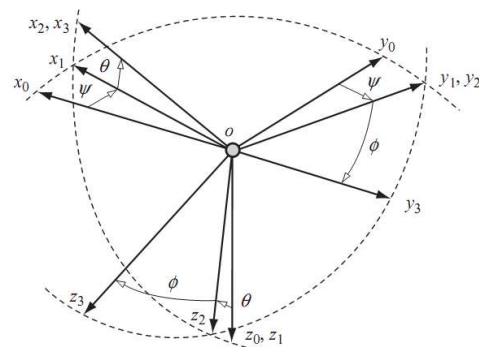
$$q = \cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} \hat{v}$$

Dengan α adalah sudut rotasi dan \hat{v} adalah vektor satuan yang berbentuk

$$\hat{v} = \frac{v}{\|v\|}. \quad (10)$$

Rotasi dalam *quaternion* dinyatakan dengan fungsi persamaan

$$f(v) = qvq^{-1}$$



Gambar 4. Euler Angles

Dengan q adalah nilai *quaternion* dan q^{-1} adalah nilai *inverse*-nya atau bisa juga digunakan *conjugate* sebagai pengganti *inverse*.

C. Persamaan Gerak pada Benda Pejal (Rigid Body)

Rigid body atau benda pejal adalah benda yang jarak antara titik-titik massa pada benda tersebut tidak berubah. Tentunya bila sebuah benda dikenai beban (misal ditekan atau ditarik) akan mengalami deformasi (perubahan bentuk), oleh karenanya tidak mungkin jarak antara titik-titik massa pada suatu benda tidak berubah bila benda tersebut dikenai beban.

Gerak benda pejal dapat dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan yaitu tiga unsur yang bersifat mempengaruhi translasi dan tiga unsur yang mempengaruhi rotasi. Persamaan gerak ini mengikuti hukum *Newton* yang kedua.

$$\sum F = ma.$$

$$\sum \tau = \frac{d}{dt}(r \times mV)$$

Kecepatan *linear* benda pejal adalah V dan terdiri dari tiga komponen, yaitu u , v , dan w .

$$V_M = ui + vj + wk$$

$$|V_M| = V_M = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$$

Dengan i , j , dan k adalah vektor satuan pada sumbu x , y , dan z . Kecepatan sudut benda pejal adalah ω dan terdiri dari tiga komponen, yaitu p , q , dan r .

$$\omega = pi + qj + rk$$

Dengan p adalah kecepatan *roll*, q adalah kecepatan *pitch*, dan r adalah kecepatan *yaw*. Besar gaya yang ada pada benda pejal dapat dipecah dalam tiga unsur:

$$F = F_x i + F_y j + F_z k$$

Persamaan percepatan benda pejal adalah :

$$a_x = \dot{u} + wq - vr + g_x$$

$$a_y = \dot{v} + ur - wp + g_y$$

$$a_z = \dot{w} + vp - uq + g_z$$

Percepatan juga dipengaruhi oleh adanya percepatan gravitasi bumi, yang diuraikan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}_{body} = C_{bn} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

Pengaruh gravitasi pada body ditunjukkan pada Gambar 3.

Benda ketika diam mengalami percepatan sebesar g :

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \sin \theta \\ g \sin \phi \cos \theta \\ g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Besar sudut ϕ dan θ dapat dihitung berdasar besar percepatan benda ketika diam:

$$\theta = \sin^{-1}(-a_x/g)$$

$$\phi = \sin^{-1}(a_y/(g * \cos \theta))$$

Hubungan antara kecepatan sudut *body* (p , q , r) dan kecepatan sudut *euler* dapat dituliskan .

$$p = \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta$$

$$q = \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta$$

$$r = \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi$$

Dalam bentuk matriks direpresentasikan sebagai:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Aturan sudut menurut *euler* ditunjukkan pada Gambar 4. Jika suatu benda dirotasi secara *yawing* (diputar sebesar sudut Ψ) maka sumbu *body* benda akan berubah dari x_0 , y_0 , z_0 menjadi x_1 , y_1 , z_1 . Selanjutnya benda dirotasi secara *pitching* (sebesar sudut Θ) maka sumbu benda menjadi x_2 , y_2 , z_2 . Terakhir benda dirotasi secara *rolling* (sebesar sudut Φ), maka sumbu benda berubah menjadi x_3 , y_3 , z_3 .

Attitude body dapat juga dicari dengan menggunakan metode *quaternion*. Konversi sumbu *body* ke koordinat tetap dilakukan dengan cara melakukan update pada parameter *quaternion*. Nilai sudut didapat dengan konversi balik *quaternion* ke sudut

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{n+1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -p\Delta t & -q\Delta t & -r\Delta t \\ p\Delta t & 1 & r\Delta t & -q\Delta t \\ q\Delta t & -r\Delta t & 1 & p\Delta t \\ r\Delta t & q\Delta t & -p\Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_n$$

Persamaan ini menunjukkan *update* parameter *quaternion* dari kecepatan sudut *body* (p, q, r).

III. METODE PENELITIAN

Perancangan sensor IMU terdiri dari dua bagian, yaitu perancangan perangkat keras dan perangkat lunak.

A. Perancangan Perangkat Keras

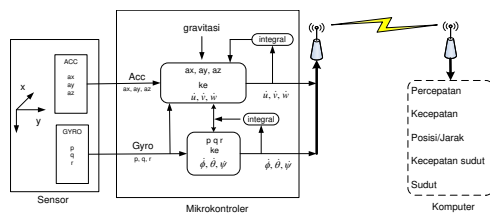
Gambar 5 memperlihatkan diagram perancangan perangkat keras IMU sebagai sistem monitoring. Perancangan perangkat keras pada penelitian ini meliputi perancangan sistem minimum mikrokontroler Atmega32, perancangan sensor *gyroscope* ADXRS150 dan sensor *accelerometer* MMA7260Q beserta *wireless* YS-1020UA sebagai *transfer* data.

Pada Gambar 6 diperlihatkan rangkaian sistem minimum mikrokontroler Atmega32 yang dihubungkan ke sensor dan komponen pendukung lainnya.

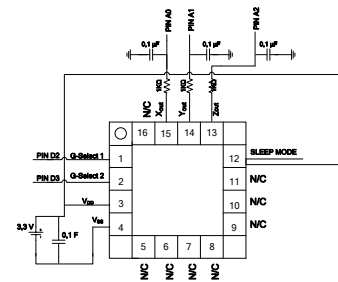
Tiga buah sensor *accelerometer* MMA7260Q dan tiga buah sensor *gyroscope* ADXRS150 digunakan untuk mendeteksi posisi benda dalam 6 derajat kebebasan. Mikrokontroler Atmega32 digunakan untuk menerima data dari sensor, mengubahnya menjadi data digital, memfilter data secara digital, dan melakukan komunikasi serial antara mikrokontroler dengan komputer sedangkan *wireless* RF YS-1020UA *tranceiver* digunakan untuk mengkomunikasikan data antara keluaran sistem dengan komputer.

Rangkaian sensor *gyroscope* ADXRS150 ditunjukkan pada Gambar 7. Sensor sumbu x akan terhubung dengan pin D.3, sumbu y terhubung dengan pin D.4 serta sumbu z akan terhubung dengan pin D.5.

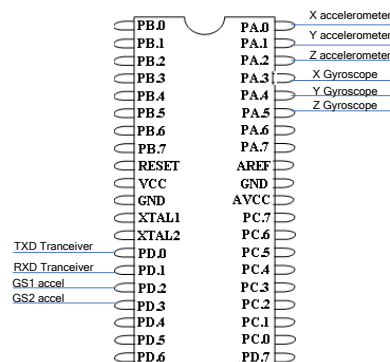
Sensor *accelerometer* MMA7260Q memiliki tingkat sensitivitas yang dapat dipilih yaitu 1,5 g/ 2 g/ 4 g/ 6 g. Tingkat sensitivitas dapat dipilih dengan melakukan pengesetan pada pin *g-select1* dan *g-select2*. Koneksi masukan dan keluaran pin-pin pada *accelerometer* MMA7260Q dapat dilihat pada Gambar 8. Keluaran X pada *accelerometer* terhubung dengan pin A0, keluaran Y dengan pin A1, keluaran Z dengan pin A2 pada



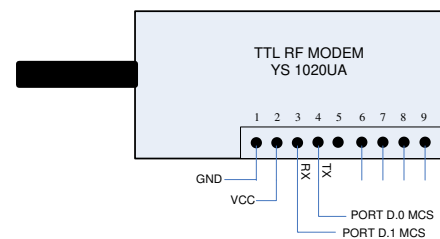
Gambar 5. Perancangan IMU



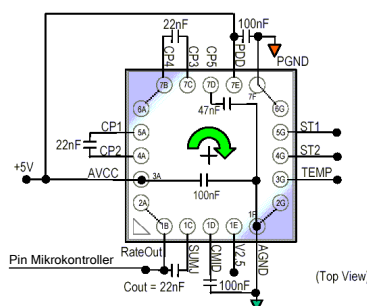
Gambar 8. Rangkaian accelerometer MMA7260Q.



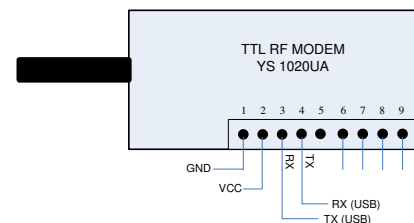
Gambar 6. Rangkaian sistem pada mikrokontroler.



Gambar 9. Wireless YS-1020UA pada mikrokontroler



Gambar 7. Rangkaian sensor gyroscope ADXR150



Gambar 10. Wireless YS-1020UA pada komputer

mikrokontroler sedangkan keluaran g-select 1 terhubung dengan pin D2 dan keluaran g-select2 terhubung dengan pin D3.

Perancangan penggunaan wireless YS-1020UA dibedakan dalam 2 kondisi, yaitu sebagai *tranceiver* yang terhubung dengan *port* mikrokontroler pada perangkat keras sistem dan *tranceiver* yang terhubung dengan komputer melalui USB *downloader* (TTL).

Hubungan *transceiver* ke mikrokontroler dapat dilihat pada Gambar 9. Pada modul wireless YS-1020UA *port* RX terhubung dengan port.D1 (TX) pada mikrokontroler sedangkan *port* TX pada wireless terhubung dengan port.D0 (RX) pada mikrokontroler. Pada bagian komputer, modul wireless YS-1020UA *port* RX terhubung dengan port TX(TTL) USB *downloader* sedangkan *port* TX pada wireless terhubung dengan port RX(TTL) pada USB

downloader. Hubungan komputer dan *transceiver* diperlihatkan pada Gambar 10

B. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak meliputi perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler dan perangkat lunak pada *Personal Computer*.

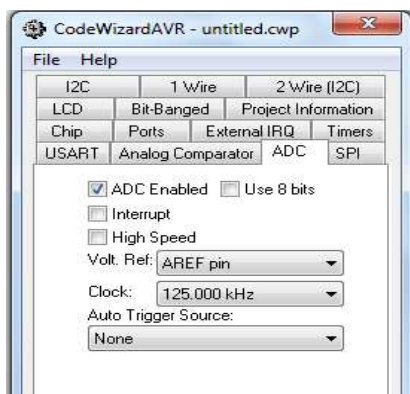
Akses data dilakukan dengan pembacaan data sensor melalui ADC internal mikrokontroler. Perancangan pembacaan ADC dilakukan melalui *setting* Codewizard pada *tab* ADC. Gambar 11 menunjukkan pengaturan *codewizard* untuk ADC. ADC yang digunakan dipilih jangkauan terbesar yaitu 10 bit untuk menunjukkan ketelitian yang lebih, kecepatan pembacaan yang dipakai 125,000 kHz, dan tegangan referensi yang digunakan sebesar V_{aref} yaitu 3,3 Volt

Proses *Rolling Average* dilakukan dengan menggunakan *sample* sebanyak 8 data. Proses ini merupakan filter untuk menghilangkan noise yang ada pada sensor accelerometer dan gyroscope.

Pengiriman data menggunakan komunikasi serial (USART) mode asinkron. Gambar 12 dapat dilihat USART pada mikrokontroler dikondisikan sebagai *transmitter* dengan mode asinkron dengan baudrate 9600 bit/s.

Pengaturan komponen *serial port* diperlihatkan pada Gambar 13. *Baudrate* yang digunakan 9600 dan komunikasi data sebesar 8 bit. Data diterima melalui *serial port* dan pengolahannya melalui komponen *timer*. Tiap data yang didapat diawali dengan data *char* yang membedakan isi data dari tiap kali pengiriman.

Data yang diterima pada PC berupa data ADC. Pembentukan data membutuhkan parameter nilai *offset*. Data ADC awal sebelum ada aksi adalah data inisial atau nol. Akan tetapi pada kenyataan, data dari ADC ketika sensor dalam keadaan diam berubah-ubah dengan angka yang mendekati nol, untuk menghilangkan osilasi ini kemudian diberikan batasan-batasan agar data ketika sensor diam bernilai nol. Pembatasan dilakukan dengan memberikan nilai osilasi terbesar dan terkecil dari osilasi yang ditunjukkan data ADC (*discrimination windows / windowing*). Data yang diperoleh akan dapat digunakan setelah dikalikan sensitifitas sensor.

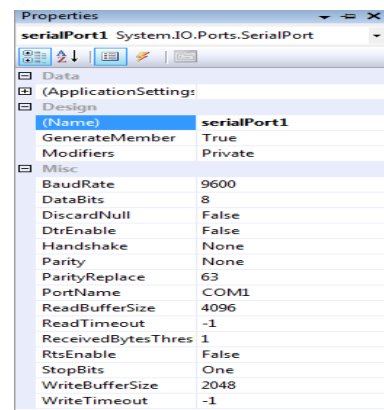


Gambar 11. Pengaturan ADC

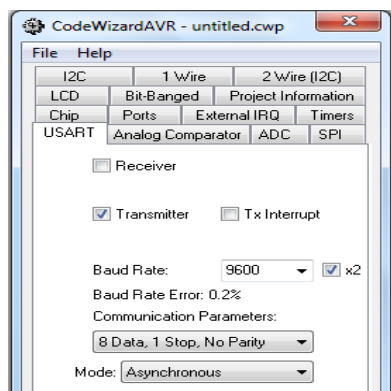
C. Perancangan Sistem Navigasi

Perancangan navigasi menggunakan algoritma INS. Skema perancangan sistem navigasi ditunjukkan pada Gambar 14.

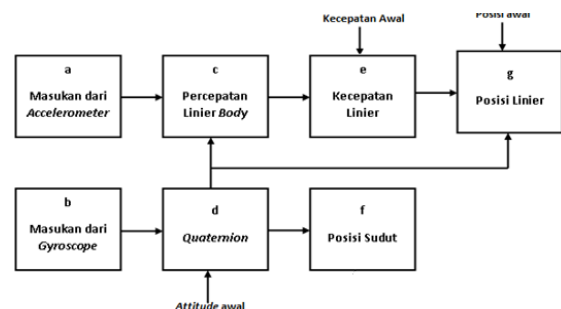
- Masukan dari *Accelerometer*
Langkah dari perancangan ini adalah merubah masukan ke dalam koordinat *body*.
- Masukan dari *Gyroscope*
Langkah kedua ini mengubah ke dalam koordinat *body* dan mengubah data ke dalam bentuk *radian*.
- Percepatan Linier *Body*
Percepatan *body* dihilangkan dari pengaruh gravitasi. *Discrimination windows* diberikan untuk percepatan.
- Quaternion*
Masukan yang didapat dari *gyroscope* digunakan untuk melakukan update *quaternion* berdasarkan *attitude awal*.
- Kecepatan Linier
Kecepatan linier didapat dengan melakukan proses integral terhadap percepatan linier. Kecepatan awal diberikan nilai 0 ketika pertama kali program berjalan.
- Posisi Sudut
Penentuan sudut baru dapat digunakan untuk menentukan faktor pengali dari *attitude*. Faktor



Gambar 13. Properti komponen serial port



Gambar 12. Pengaturan USART



Gambar 14. Skema perancangan sistem navigasi

TABEL I
PENGUJIAN ROTASI

No	Sudut referensi (°)			Sudut Perhitungan (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	90	0	0	89,960	2,241	3,158
2	0	90	0	1,075	89,278	2,873
3	0	0	90	1,259	0,529	90,895
4	90	90	0	89,367	86,897	7,259
5	90	0	90	84,118	9,572	87,798
6	0	90	90	4,546	87,957	89,338
7	90	90	90	76,681	85,091	81,962

pengali digunakan untuk *update* matriks *quaternion* untuk navigasi dan diberikan faktor pengali.

g. Posisi Linier

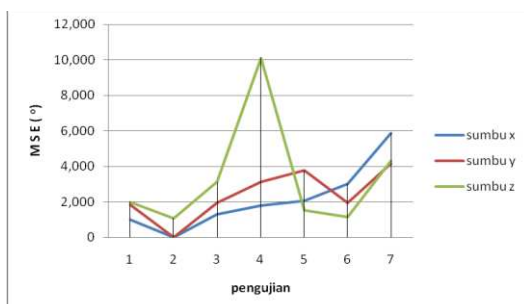
Penentuan posisi linier diawali dengan melakukan transformasi vektor kecepatan dari koordinat *body* ke koordinat tetap kemudian ke koordinat navigasi.

D. Data Pengujian Rotasi dan Translasi

Pengujian dilakukan dengan rotasi benda dengan metode INS yang digunakan. Hasil pengujian diperlihatkan pada Tabel 1 dan Gambar 15

Hasil pengujian menunjukkan rata-rata hasil pengukuran untuk attitude. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa antara pengukuran dengan penggaris busur dan perhitungan dengan INS belum sesuai dan terdapat selisih antara hasil nyata dan hasil pengukuran. Perbedaan pada perhitungan ke-1, 2, 3, 4, 5 dan 6 disebabkan karena ketika benda diputar pada satu sumbu, maka sensor pada sumbu yang tidak diputar juga ikut bereaksi, sehingga mengakibatkan perhitungan dengan INS mendeteksi adanya perubahan posisi sudut walaupun sebenarnya tidak terjadi gerak.

Hal yang mempengaruhi perbedaan secara umum (seluruh pengujian) yaitu respon gerak sensor yang tidak ideal, sehingga mempengaruhi ketelitian dalam perhitungan. Hasil pengujian translasi diperlihatkan pada Tabel 2 dan Gambar 16.



Gambar 15. MSE pengujian rotasi

TABEL II
HASIL PENGUJIAN TRANSLASI

No	Posisi Referensi (cm)			Posisi perhitungan (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	30	0	0	28,86	1,06	2,28
2	0	30	0	0,7	31,89	1,32
3	0	0	30	1,4	6,52	32,04
4	30	30	0	26,49	27,24	1,94
5	30	0	30	32,12	7,5	25,38
6	0	30	30	0,9	32,72	33,26
7	30	30	30	25,5	30,6	38,36

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa hasil pengukuran dengan mistar dan perhitungan dengan INS terdapat perbedaan. Hal pertama yang menyebabkan adalah kesalahan pada perhitungan *attitude* sehingga terjadi kesalahan dalam penentuan jarak x, y, dan z. Hal kedua yang menjadi penyebab (pada pengujian 1, 2, 3, 4, 5, dan 6) adalah ketika benda digerakkan searah satu sumbu maka karakteristik sensor sumbu yang lain akan ikut mendeteksi. Hal ketiga penyebabnya adalah respon sensor yang tidak ideal (tidak seimbang antara percepatan dan perlambatan) sehingga menyebabkan harus dilakukan pengecekan akhir bergerak yang tentunya mempengaruhi ketepatan perhitungan.

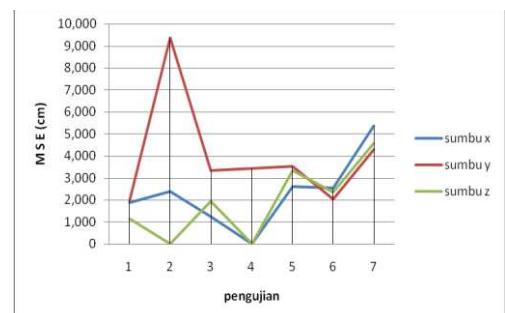
E. Tampilan Monitoring Gerak

Pada Gambar 17 dan Gambar 18 diperlihatkan posisi benda sebelum gerak dan setelah digerakkan.

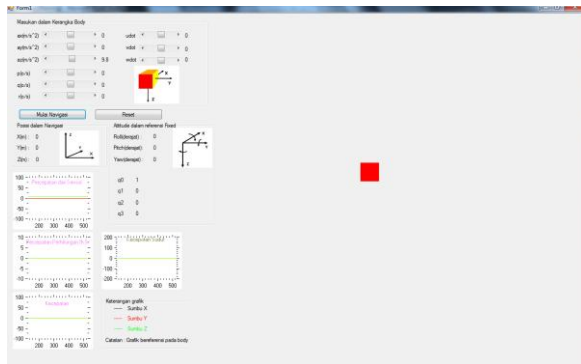
IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

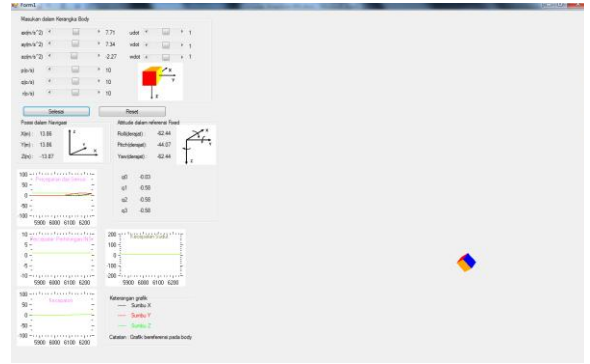
1. Keluaran dari *accelerometer* dan *gyroscope* dalam keadaan diam tidak stabil sehingga perlu diberikan *discrimination windows*.
2. Perhitungan *attitude* yang tidak akurat akan mengakibatkan kesalahan pengurangan nilai *offset* dan kesalahan penghitungan posisi.



Gambar 16. MSE pengujian translasi



Gambar 17. Tampilan awal monitoring



Gambar 18. Tampilan saat gerak rotasi dan translasi

3. Algoritma INS yang digunakan untuk mengukur posisi *attitude* 90° terhadap sumbu x, y, z dengan 7 macam variasi pengujian menghasilkan MSE rata-rata sumbu x sebesar $2,277^\circ$, sumbu y sebesar $2,519^\circ$, dan sumbu z sebesar $3,334^\circ$ sedangkan pengukuran untuk translasi dengan pengujian 30 cm ke arah sumbu x, sumbu y, dan sumbu z dengan 7 variasi pengujian menghasilkan MSE sebesar 2,659 cm untuk sumbu x, 3,995 cm untuk sumbu y, dan 2,142 cm untuk sumbu z.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Elkaim, GH., M. Lizzaraga, 2008, "Comparison of Low-cost GPS/INS for Autonomus Vehicle Application, IEEE
- [2]. Gamble, Allan E. and Jenkins, Philip N., 2001, "Low Cost Guidance for the Multiple Launch Rocket System (MLRS) Artillery Rocket", US Army Aviation and Missile Command, IEEE AES Systems
- [3]. Jitpakdee, Rubkwan, 2008, "Neural Network Terrain Classification using IMU for Autonomus Vehicle", SICE Annual Conference, Japan
- [4]. Kang, Chunpeng, Zhing Su, 2008, "Design of Data Acquisition and Processing System for IMU" International Symposium on Intelligent Technology Application Workshop, IEEE Computer Society
- [5]. Kapaldo, Aaron J, 2005, "Gyroscope Calibration and Dead Reckoning for an Autonomus Underwater Vehicle", Masters Thesis Virginia Polytechnic.
- [6]. Siouris, Gerge M., 2004, "Missile Guidance and Control System" Springer-verlag New York
- [7]. Skog, Isaac, Peter Handel, 2006, "Calibration for a MEMS IMU", XVII Imeko World Congress, Rio de Janeiro, Brazil
- [8]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "Design and Application of The Exponential Filter on Rotation Estimation Using The Angular Rate Sensor (Gyroscope)", The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009), ISBN : 978-979-98010-5-0, Department of Physics, Institut Teknologi Bandung.
- [9]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "A Comparison between Exponential Filter and FIR Filter on Accelerometer Data Acquisition", The Quality in Research (QIR 2009), ISBN : 978-979-98010-5-0, Department of Electrical, University of Indonesia.
- [10]. Wang, Jiandong. Liu, Yunhui., Fan, Weihong., 2006, "Design and Calibration for a Smart Inertial Measurement Unit for Autonomus Helicopters Using MEMS Sensors", National University of Defense Technology Changsha, Hunan, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation
- [11]. Zunaiddi, Ibrahim, Norihiko Kot., 2006, "Positioning System for 4-Wheel Mobile Robot : Encoder, Gyro and Accelerometer Data Fusion with Error Model Methode, International Journal of natural Science Chiang Mai University